

O DESENVOLVIMENTO DA METALURGIA (*) (**)

CONFERÊNCIA ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS

*Prof. Robert Franklin Mehl (***)*

Constitue uma distinção especial o ser convidado para proferir a Primeira Conferência Anual, nesta primeira Reunião Geral da Associação Brasileira de Metais. E' uma gentileza a mais, entre as muitas com que tenho sido distinguido durante minha agradável permanência neste país; por tôdas lhes sou muito grato.

Apresento os meus votos de melhor êxito à nova Associação Brasileira de Metais aos quais junto as felicitações das associações de metalurgistas de meu país que, por meu intermédio, lhe desejam o melhor futuro.

Esta primeira reunião de metalurgistas neste grande e poderoso país é um acontecimento histórico de importância, e como tal deve ser e será reconhecido. Considerando o futuro, existe para o Brasil um campo de largas perspectivas de desenvolvimento na ciência e na indústria, e neste desenvolvimento será preponderante o papel da metalurgia. As nações dependem dos metais; há muito tempo que se reconheceu que o país que possui recursos naturais de metais pode se tornar uma grande potência, bem equipada para atravessar as crises da história, e sei que o Brasil conta com largos recursos neste setor. No desenvolvimento da tecnologia dos metais desempenham papel de maior importância as associações técnicas. Estas associações, através de seus membros, dirigem e operam as indústrias, e seus engenheiros muito têm que aproveitar no contacto com seus colegas, todos aperfeiçoando-se em capacidade técnica, em cultura e em relações,

(*) Conferência Anual da Associação Brasileira de Metais pronunciada a 27 de abril de 1944 durante a realização da Primeira Reunião Geral.

(**) Tradução do Eng.º Tharcisio D. de Souza Santos, Secretário da ABM.

(***) Membro ABM; Professor e Diretor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Diretor do Laboratório de Pesquisas de Metais, Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, Pennsylvania, Estados Unidos; Professor Contratado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; doutor "Honoris-Causa" pela Universidade de S. Paulo.

através dêste espírito de associação. A ninguém é dado duvidar que o Brasil virá ocupar uma posição de destaque em metalurgia e a Associação Brasileira de Metais muito pode contribuir para alçá-lo a essa posição. E' assim um acontecimento histórico esta Primeira Reunião Geral.

Levei bastante tempo para escolher o tema desta Primeira Conferência Anual. Já estou aqui há cêrca de três meses durante os quais tenho discorrido bem frequentemente sôbre a ciência e sôbre a engenharia metalúrgica e eu me admiro da paciência dos presentes para vir aqui para me ouvir mais uma vez. Por essa razão, não pareceu conveniente discorrer agora sôbre qualquer fase puramente técnica da metalurgia, porque, em ocasião como a presente, na qual se inaugura na realidade um movimento cultural, pareceu-me mais adequado considerar sob um prisma mais ampla a metalurgia, para tentar ver como foi creada a ciência e a engenharia metalúrgica, em resumo, para apresentar numa hora uns poucos capítulos do desenvolvimento histórico da metalurgia.

Conquanto sejamos frequentemente levados a crer que a ciência é um assunto caracteristicamente preciso e exato, frio e destituido de emoções, o certo é que a ciência desenvolveu-se pelo trabalho humano e que a natureza humana deixou suas marcas na história das ciências. Os seres humanos procuram a verdade na ciência que evolue pela satisfação da criação de algo que perdure. Seus precursores foram homens modestos, porque êles se defrontaram com todo o mundo desconhecido da natureza que se lhes apresentava; tinham suas ambições, fraquezas e forças, e viveram apenas curtos espaços de tempo. Dispersas nas histórias dos homens que fizeram a ciência encontram-se as forças dinâmicas que conduziram aos progressos realizados. O largo campo da história da ciência é composto destas histórias menores, e a glória da ciência é a resultante dessas glórias individuais. Cada capítulo na história da ciência é um relato do trabalho de homens, uns em seguida aos outros, na missão de dilatar as fronteiras do conhecimento.

A história da metalurgia está intimamente entrosada com as histórias dos outros ramos da ciência e da engenharia; participa delas, da mesma forma que estas se lhe relacionam. A história da metalurgia propriamente dita é um conjunto de assuntos que vão da mais complicada ciência pura aos da mais prática e utilitária das engenharias. Seria impossível tentar abranger, de forma adequada, todo êste vasto assunto em uma conferência: vários volumes seriam necessários.

Vou tentar contar-lhes algumas histórias, no campo restrito da metalurgia física. Poderei assim citar os nomes de alguns homens, frequentemente grandes homens, que contribuíram com suas

vidas para este setor da ciência, da mesma forma que outros prestaram a sua contribuição em outros campos e com o mesmo espírito.

Não se sabe ao certo quem produziu pela primeira vez o ferro, o cobre ou a primeira ferramenta. (1) O primeiro ferro foi produzido, provavelmente, por algum habitante primitivo que, tendo aceso fogo ao pé de um barranco de minério de ferro, notou a presença de lupas de material pesado e maleável nas cinzas. Com toda certeza, muitas repetições dessa descoberta foram necessárias antes que a inteligência incipiente pudesse associar o efeito à causa, e com toda a certeza muito tempo decorreu até que ele pudesse melhorar o processo, visto que o conceito de melhoria e de progresso chegou com dificuldade à raça humana. O processo continuou a ser melhorado e a consequência dessa evolução foi a forja catalã; nela, deliberadamente, pode ser produzido o ferro e com ela começa um novo período em que se pode controlar melhor a produção e uso deste importante metal. É possível que mesmo no princípio houvesse sido notada a semelhança entre as pequenas lupas obtidas e os meteoritos que já eram conhecidos e que já eram transformados em ferramentas; abria-se, assim, o grande futuro de se poder fabricar as ferramentas que se desejasse. A história da civilização pôde ser escrita em termos das ferramentas e dos usos que delas fizeram os homens.

Não se sabe também quem produziu o primeiro aço. (2, 3) Os egípcios já o conheciam quando as pirâmides foram construídas. E os romanos já tinham o aço e conheciam os processos para produzi-lo antes mesmo da época dos aços de Damasco e de Toledo.

Em todo o tempo dos romanos, e especialmente na idade média, avançou continuamente o conhecimento dos metais. (4) Nos grandes tempos da alquímia eram muitos os que se dedicavam aos metais; Paracelcius, um dos primeiros químicos, era principalmente um metalurgista. Na realidade, podemos dizer aos nossos amigos químicos que a química é na realidade um setor da metalurgia! Efetivamente, à medida que crescia rapidamente o conhecimento dos metais e das ligas, as idéias a eles ligadas eram intremeadas de superstições e mágica e por isso a pesquisa da pedra filosofal e do elixir da longa vida tinha precedência sobre a pesquisa da pura verdade científica. Talvez o alquimista, se ele vivesse hoje, poderia responder que seus esforços não eram simples sonhos, porque nós podemos agora fazer a transmutação de metais (muito embora as quantidades sejam apenas microscópicas!); poderia também dizer que o aumento da duração da vida pela medicina moderna é uma aproximação ao elixir (e talvez, vendo o nosso mundo atual, espantar-se-ia de os homens queressem viver mais tempo!). Na verdade, as idéias dos alquimistas,

que muitas vezes não podiam ser separadas da mágica, parecem estranhas para nós — os estranhos processos aconselhados para a têmpera do aço e aquela receita que recomendava para a têmpera de uma espada de aço atravessar com ela o corpo de um escravo gordo. (4) Mas tudo isso ocorria na aurora da verdadeira inteligência científica. Nossas idéias acêrca da natureza do espírito ou sôbre a organização social sem dúvida alguma parecerão igualmente exóticas daqui a mil anos.

Francis Bacon, que viveu no período do grande metalurgista Agrícola, é muitas vezes considerado como o pai da ciência moderna. Certamente muito fez êle para arrancar a ciência das sombras do conhecimento e do conhecimento das sombras, visto que insistia sôbre a importância do método experimental, e felizmente conseguiu sobrepujar o autoritarismo de Aristóteles que governou o pensamento grego e romano, fazendo com que uma experiência, simples e modesta, nas mãos de qualquer pessoa, fosse se tornar a única côrte de autoridade. E' grande o nome de Bacon na ciência. Com um largo campo de interêsse êle estudou os metais; eu mesmo procurei algumas de suas obras para referências sôbre metais; interessava-lhe a formação das ligas e, curiosamente, havia percebido as complexidades no estudo das ligas ternárias e quartenárias, da mesma forma que nós, hoje em dia; havia mesmo dito "as ligas de três ou mais metais exigem muito tempo para serem estudadas, salvo no caso de algumas composições que já são conhecidas". (5)

Meteoritos: —

Os meteoritos foram mencionados há pouco e êste é um bom assunto para iniciar a exposição de alguns capítulos da metalurgia física. Sabe-se que os meteoritos compreendem duas categorias principais: meteoritos rochosos e meteoritos ferrosos. Os meteoritos ferrosos constituem apenas uma fração pequena dos meteoritos e são na realidade ligas de ferro e níquel, contendo de seis a oito por cento de níquel e pequena porcentagem de fósforo, enxofre, cobalto e muitos outros elementos; frequentemente contêm escória e algumas vezes grafita.

A história dos meteoritos de há muito tempo que está ligada à história da humanidade. Parece certo que o homem primitivo havia encontrado meteoritos e havia aprendido a martela-lo e conformá-lo em ferramentas de vários tipos. Mesmo recentemente, no fim do século passado, Perry em sua exploração da Groenlândia verificou que esquimós utilizavam um grande meteorito para fazer ferramentas, com grande dificuldade; êste meteorito era chamado "A Velha". Convem lembrar que os Vikings faziam espadas de meteoritos; de um em particular, conhecido como "Es-

pada Celeste”; estas espadas eram relativamente macias e por isso os combates tinham de ser interrompidos de tempo a tempo, por uma espécie de entendimento recíproco, para permitir que os combatentes se retirassem para endireitar as espadas e recomeçar a luta. Entretanto, é menos sabido que o estudo dos meteoritos através dos séculos muito contribuiu para o conhecimento da natureza das ligas, e essa a história que eu vou agora lhes contar. (6, 7, 8)

Antigamente acreditava-se que os meteoritos fossem de origem sobrenatural e se originaram muitas lendas pelas quais a visita dêstes viajantes do céu, por seu aspecto extranho, se relacionava à volta do espírito de um tirano odiado. Apesar disso, mesmo a idéia de sua origem celeste foi depois esquecida: o grande estadista e cientista americano Thomas Jefferson, quando ouviu dizer que dois professores de Yale haviam observado a queda de um meteorito, exclamou que êle acreditaria antes que aqueles dois profesoeres Yankees estivessem mentindo do que pedras pudessem cair do céu! A controvérsia, numa ocasião, generalizou-se tanto que a Academia Francesa de Ciências sentiu-se na obrigação de nomear uma comissão para estudar o assunto, a qual, felizmente decidiu que era bôa a evidência da origem celestial!

O interêsse científico sôbre a estrutura interna dos meteoritos começou em 1808 quando Alois de Widmanstaetten, diretor da Fábrica Imperial de Porcelana de Viena, obteve um meteorito ferroso, conhecido como “meteorito Agram”, cortou-o, poliu sua superfície e atacou-a. Observou então, pela primeira vez, aquela linda estrutura, conhecida agora como a estrutura de Widmanstaetten, uma estrutura interna composta de lâminas encrustadas numa matriz — famílias de lâminas paralelas disposta em quatro orientações no espaço, pela intersecção dessas lâminas com a superfície de polimento e revelando ao ataque uma estrutura cristalina perfeitamente geométrica. Esta estrutura fascinou aos mineralogistas. Mostrou-se, mais tarde, que um meteorito poderia ser clivado ao longo das superfícies das lâminas, segundo um octaedro; sôbre o ponto de vista da cristalografia, a estrutura foi reconhecida como octaédrica. (9)

Sorby, na Inglaterra, era um petrógrafo interessado no estudo de lâminas de rochas sob o microscópio. Soube da estrutura de Widmanstaetten dos meteoritos, uma estrutura microscópica, vista facilmente a olho nú e lhe ocorreu que talvez o aço comum tivesse também uma estrutura semelhante, impossível entretanto de ser vista a olho nú, mas possivelmente bastante grossa para ser observada sob o microcópico, se a amostra de aço pudesse ser bem polida e atacada.

Experimentou sua idéia, que foi confirmada: (10) a estrutura estava ali e assim nasceu a ciência da metalografia, uma ciência

que tem contribuído enormemente para o conhecimento de ligas tanto sob o ponto de vista científico como sob o ponto de vista prático. É muito grande a atividade nessa ciência, hoje em dia — dezenas de milhares de microscópios são hoje empregados no estudo de metais e o novo microscópio eletrônico, com seu fenomenal poder de resolução, está hoje aumentando constantemente os nossos conhecimentos. (11, 12)

Até cerca do fim do século passado pouco se sabia acerca da verdadeira natureza da constituição das ligas. O trabalho de Sorby dera um método para o estudo interno da estrutura, mas os princípios gerais científicos que governavam a estrutura eram desconhecidos e o estado da ciência se resumia principalmente numa catalogação de fatos observados. Este aspecto será considerado com maior detalhe logo mais; por enquanto, basta considerar que o passo seguinte no estudo dos meteoritos havia revelado que eles eram na realidade de estrutura duplex. Osmond e Carteaud, (13) revelando este ponto, encontraram uma explicação no fato desta liga sofrer uma transformação no resfriamento, que nas temperaturas elevadas o meteorito consistiu de um cristal único da fase gama a qual, no resfriamento, precipitava uma nova fase, a fase alfa, e que essa fase se precipitava em lamelas paralelas ao plano interno do octaedro (o plano [111]) do cristal, em temperatura elevada. Este constituiu um princípio importante que tem hoje grande aplicação e é de importância fundamental. Incidentalmente convem observar ainda que Osmond, Neumann e outros, haviam observado as marcas estriadas dos meteoritos, conhecidos agora como “linhas de Neumann” e as identificaram como faixas de maclação, (14, 15) formadas por impacto; esses pioneiros notaram mais que elas se dispunham paralelas ao plano [111] da fase alfa e iniciaram assim o estudo da cristalografia da deformação dos metais sólidos, da qual resultou uma importante soma de pesquisas na última geração, como vamos ver adiante.

A estrutura Widmanstaetten tem sido recentemente muito estudada, principalmente por meio da difração de raios X. (14) A observação de se disporem as lâminas da fase alfa paralelamente aos planos do octaedro ou plano [111] da fase gama conduziu à seguinte questão: qual é o plano do reticulado alfa na superfície da lâmina alfa que se dispõe paralelamente ao plano [111] da fase gama ou, mais genericamente, qual é a relação de orientação existentes entre as fases alfa e gama? Verificou-se que o plano na fase alfa é o plano dodecaedro, ou plano [110] (16) e que a disposição dos átomos e as distâncias interatômicas desses dois planos conjugados são sensivelmente idênticas. A teoria é óbvia: o reticulado alfa forma-se do gama, no resfriamento, por um pequeno deslocamento de átomos, transformando-se o plano gama [111] no plano alfa [110]. Verificou-se ainda que o tipo de es-

trutura Widmanstaetten ocorre em tôdas as ligas que apresentam transformações no estado sólido e é atualmente bem conhecido o mecanismo atômico e cristalográfico desta transformação.

As ligas envelhecíveis caem nesta categoria, porque o processo de envelhecimento, em ligas do tipo duralumínio, consiste essencialmente na precipitação de uma solução supersaturada. (17)

Um século de estudos sôbre meteoritos trouxe em consequência, recentemente, a compreensão completa de princípios fundamentais, como vamos ver na parte seguinte.

Envelhecimento: —

Em 1911 Wilm, (18) metalurgista que se dedicava às ligas de alumínio, tentou descobrir qual o tratamento térmico que modificasse as propriedades do duralumínio comercial, uma liga de alumínio com pequena porcentagem de cobre e menores teores de magnésio, silício e manganês. Observou êle que, embôra o resfriamento brusco não endurecesse o duralumínio, como acontece com o aço, depois da têmpera a liga se tornava cada vez mais dura. O aumento em dureza era acompanhado de aumento de limite de escoamento e de resistência à tração e de decréscimo das propriedades de ductilidade, como o alongamento. Nisso consiste essencialmente o processo de envelhecimento. Sem uma explicação adequada era impossível se saber se essa propriedade era sómente peculiar ao duralumínio ou se era mais geral e, em consequência, pudesse também vir a ser encontrada em outras ligas. E sem êsse princípio orientador não se descobriram outras ligas envelhecíveis, apesar da potencial importância prática do processo de envelhecimento.

Coube à Merica, (19) do Bureau of Standards, descobrir êsse princípio em 1919. Êle e seus colaboradores não puderam também descobrir nenhuma mudança na microestrutura, mas observaram que a solubilidade sólida do cobre no alumínio diminuiu com a temperatura. O esfriamento da liga iria precipitar cobre (mais precisamente a fase intermediária "CuAl₂"), (*), o resfriamento rápido tenderia a reter a solubilidade sólida característica da temperatura elevada e o envelhecimento determinaria a formação do precipitado com o tempo. Dessa forma Merica desenvolveu a sua hoje famosa teoria de envelhecimento: 1) que, em temperatura elevada, o cobre está em solução sólida no alumínio; 2) que a solubilidade sólida diminui com a temperatura; 3)

(*) Esta fase é escrita entre aspas porque sua composição, da mesma forma que de muitas outras fases intermediárias, não corresponde exatamente à relação estequiométrica indicada.

que o envelhecimento depois da têmpera da soluço sólida supersaturada precipita a fase "CuAl₂"; 4) que êste precipitado   sub-microscópico; e 5) que o endurecimento é causado, ou pelo estado de extrema sub-divisão do precipitado, que impede o escorregamento nos planos atômicos e em consequência endurece a liga, ou por uma inter-aço atômica entre as partículas do precipitado e da matriz.

Esta teoria é extremamente importante e hoje em dia ela permanece inalterada, a não ser em dois de seus pontos, a saber: a técnica metalográfica revelou mais recentemente a evidência da precipita o e existe uma outra evidência quanto ao ponto "5". Mas para produzir novas ligas envelhecíveis as condi es 1 e 2 são adequadas; basta, para tanto, pesquisar ligas com uma varia o adequada da solubilidade sólida com a temperatura. Não existe nenhum exemplo melhor da grande importância da teoria sôbre o desenvolvimento da ciência e da engenharia. Antes do trabalho de Merica nenhuma liga envelhec vel havia sido encontrada; depois dele, muitas centenas de ligas dêste tipo foram desenvolvidas deliberadamente, muitas das quais da maior importância na metalurgia e, além disso, muitos comportamentos an malos de ligas puderam ser explicados pelo envelhecimento, como por exemplo, a fragilidade do aço envelhecido depois de encruado. (20)

Posteriormente Jeffries e Archer (21) chamaram a aten o sôbre a influência do tamanho da partícula sôbre o endurecimento. Admitiram que para um certo tamanho crítico de partícula há "dispersão crítica", a qual produz o máximo de dureza, admitindo que esta dispersão assegura o número suficiente de partículas para evitar o escorregamento em cada plano atômico; quando o envelhecimento   prolongado, essas partículas coalescem em partículas maiores, porém em menor número, e menor número de planos bloqueados trazem em consequência o começo do amolecimento, isto é, o ultra-envelhecimento.

Pouco depois começaram a aparecer complica es as quais trouxeram d vidas sôbre esta teoria simples da precipita o. A teoria estabelece a decomposi o de uma soluço sólida. Pode-se mostrar facilmente que isso traria em consequência o aumento da condutividade elétrica, (17) entretanto em muitas ligas se observava uma diminui o; além disso, muito emb ra as distâncias entre átomos variem esta concentra o e, em consequência, alterar as distâncias inter-atômicas, e isso não era observado em muitas ligas envelhecíveis. Para explicar anomalias foram apresentadas teorias mais complicadas, admitindo que poderiam ocorrer mudanças nas solu es sólidas mesmo na ausência de verdadeira precipita o, muito emb ra esta concep o fosse apriorística e

todo o processo se tornasse consideravelmente mais complicado. (17)

Entretanto Fink e Smith (22) demonstraram, pelo emprêgo de uma técnica metalográfica melhorada, que se podem observar modificações nos primeiros estágios de envelhecimento e concluíram, com acêrto, que as mudanças nas distâncias inter-atômicas não podem, por essa razão, ser aceitas como critério de precipitação; parece que a precipitação era severamente localizada, com a maior porção da liga não afetada nos primeiros estágios e, em consequência, nenhuma alteração nas distâncias inter-atômicas podia ser observada por difração de raios-X. E parecia possível que o comportamento anômalo da condutibilidade elétrica fôsse característico do precipitado finamente dividido, imerso na matriz.

Esta imagem é, entretanto, simples demais. A idéia de que a simples precipitação seja suficiente para explicar o envelhecimento é difícil de se poder aceitar, pois em alguns casos, teores da ordem de 0,04% bastam para assegurar o envelhecimento, ao passo que em outros são necessários teores de ordem de 10% para o mesmo resultado (20). Além disso, parece provável que a precipitação das soluções sólidas devesse ser acompanhada por intervalos bem definidos no movimento atômico, os quais não são considerados numa simples precipitação.

A sugestão de uma teoria mais completa se originou do estudo das relações de orientação entre a matriz e o precipitado, como são observadas nos meteoritos. As relações de orientação descobertas nos meteoritos que sofreram idêntica mudança de fase são também encontradas em ligas envelhecíveis e destas podem ser derivados os processos análogos, atômicos e cristalográficos, de movimentos de átomos pelos quais a fase da matriz se transforma em fase do precipitado. Estes movimentos que ocorreram no sistema sólido relativamente rígido sofrem, entretanto, certas restrições: o plano dos átomos no precipitado que se forma de um plano aproximadamente idêntico de átomos na fase da matriz, não se separa facilmente desse plano da matriz; as ligações atômicas ao longo dessa interface tendem a manter, tanto quanto possível, uma continuidade de reticulado ou coerência através da interface. Deforma-se assim o reticulado do precipitado e esta deformação é equilibrada por uma deformação de compensação, de sinal oposto, na matriz. A deformação do precipitado impede que os átomos no precipitado ocupem precisamente as posições do reticulado, características do precipitado, resultando, no caso extremo, um reticulado de transição. (23) As deformações decorrentes na matriz parecem constituir a origem das anomalias das propriedades, como por exemplo da condutibilidade elétrica, e parece ser a causa fundamental do endurecimento.

A Constituição das Ligas: —

Modernamente, a discussão do comportamento de uma liga começa necessariamente com a discussão da sua constituição, mas muitos anos de estudo e de evolução foram necessários para que pudesse ser iniciado o estudo racional da constituição das ligas.

As ligas eram conhecidas nos tempos pre-históricos e mesmo a Bíblia as menciona. Os alquimistas sempre estiveram muito interessados nas possibilidades de formação das ligas e esperaram mesmo que, pela liga de dois metais básicos, pudessem produzir ouro e outros metais preciosos. (5) Durante o grande ímpeto da pesquisa científica no século XIX a formação de ligas de metais foi objeto de verdadeiro interesse científico. Observou-se que o ponto de solidificação de um metal podia ser alterado pela introdução de um segundo metal; esta observação era de grande importância prática e muitos pesquisadores começaram a determinar os pontos de solidificação dos sistemas de ligas pelo emprêgo de curvas de resfriamento, isto é, medindo as temperaturas em função dos tempos de resfriamento e verificando a posição do patamar de solidificação.

Le Chatelier inventou o par termo-elétrico para a medida de temperaturas e foi enorme a importância prática desta descoberta no estudo das ligas. Heycock e Neville (24) na Inglaterra, e outros, fizeram medidas cuidadosas do resfriamento de uma série de ligas à base de cobre. Osmond (25) na França mostrou como as ligas de ferro-carbono, os aços, apresentam no resfriamento pontos críticos, demonstrando serem as transformações no estado sólido análogas aos pontos de solidificação, e Sauveur, (26) nos Estados Unidos, e Roberts-Austen, (4) na Inglaterra, representaram êstes pontos em função da temperatura e da composição. Apesar de tudo isto, êstes resultados eram puramente empíricos e não havia nenhuma base para a generalização ou para racionalizar os resultados das experiências.

Esta generalização é a lei das fases. Entre 1860 e 1880 na Universidade de Yale, nos Estados Unidos, o físico J. Willard Gibbs, dedicou-se ao estudo dos princípios térmico-dinâmico de equilíbrios heterogeneos e publicou uma série de trabalhos que, desde então, se tornaram clássicos e que constituem na realidade uma das maiores contribuições científicas. (27) Desenvolveu uma relação bem simples entre os seguintes fatores: número de componentes pelo qual pode ser definido um sistema (dois numa liga binária, três numa liga ternária, etc.) o número de fases presentes e o número de variáveis (temperatura, pressão e concentração) que podem sofrer variações enquanto se mantém constante o número de fases. Com o auxílio da lei das fases pode ser realmente

compreendida a constituição dos sistemas de ligas, interpretadas devidamente as observações experimentais e pode ser expressa de forma compreensível a verdadeira constituição das ligas. A lei das fases tem sido de importância fundamental para os metalurgistas.

Entretanto Gibbs publicara êstes trabalhos num obscuro jornal da Academia de Ciências de Connecticut e durante muitos anos êles lá estiveram enterrados sem que nenhuma físico-químico ou metalurgista houvesse tido seu conhecimento. Foi um físico-químico, Ostwald, que descobriu êsse trabalho por volta do fim do século passado e que realçou a sua grande importância no campo da físico-química. Ostwald propagou o trabalho de Gibbs; Roozeboom, (28) na Holanda, utilizou-se para derivar os tipos possíveis de diagramas de fases-diagramas que mostram o número de fases que ocorrem em função da pressão, temperatura e concentração — e Osmond, na França, aplicou a lei das fases à constituição dos meteoritos e dos aços. Com a lei das fases estabelecida no espírito dos físico-químicos e dos metalurgistas, abriu-se a possibilidade de determinar a constituição do sistema de ligas binárias e terciárias, etc. com o progresso científico e com todos os resultados práticos que trazia. Em todos os centros adiantados, cientistas empreenderam estudos sistemáticos sôbre a constituição das ligas e foi principalmente o Professor Gustav Tammann (29) que creou uma grande escola dedicada principalmente a êste estudo. Tammann interessou-se principalmente pela natureza de compostos formados entre metais, e através dos esforços de muitos de seus discípulos foram pesquisadas as constituições de dezenas de sistemas de ligas. Seus discípulos continuaram posteriormente êste trabalho e muitos deles, em muitos países, se tornaram figuras destacadas em metalurgia na geração seguinte. Tammann, já falecido, foi uma das maiores figuras da metalurgia; dedicou-se a muitos de seus campos e produziu trabalhos originais sôbre muitos assuntos que posteriormente se desenvolveram em setores importantes da metalurgia física.

Desde o começo dêste século, foi determinada a constituição de muitos sistemas binários e no decorrer do tempo apareceram novos recursos para esta classe de estudos como também tem sido considerável a atenção prestada à precisão na determinação da constituição. À medida que cresceu êste conhecimento acumulado tornou-se possível racionalizar as descobertas e descobrir os fatores físicos que determinam a formação de soluções sólidas e de fases intermediárias. E' digno de menção especial, sob êste ponto de vista, o trabalho recente de Hume-Rothery. (30) Pode-se dizer que nós sabemos agora porquê alguns metais formam soluções sólidas e outros não, porquê alguns apresentam uma pro fusão de fases intermediárias e outros nenhuma e porquê alguns

apresentam formação de super-reticulados ao passo que outros não. Os fatores que determinam esta constituição são naturalmente atômicos e compreendem a valência e os níveis de energia eletrônica.

Tratamento térmico de aços: —

Poucos fenômenos físicos chamaram tanto a atenção quanto o do endurecimento que sofre o aço quando aquecido e em seguida mergulhado na água. E' velha a arte e nova a ciência. As idéias de Reamur (4, 31) em 1722 eram surpreendentemente avançadas, bem como as de uns poucos outros, mas êsses homens realmente precederam a sua época e ficou para os pesquisadores do fim do século passado e do começo dêste apresentar uma sólida base científica para o conhecimento do tratamento térmico dos aços.

A arte havia tido um desenvolvimento enorme. Chineses e indús produziam aço pela cementação de ferro-esponja antes mesmo do fim da era cristã. Na idade média, os aços de Damasco e de Toledo eram famosos e com razão; as excelentes propriedades dêsses aços parecem ter origem no seu forjamento nas visinhanças dos pontos críticos.

A origem do desenvolvimento da ciência do tratamento térmico vem dos primeiros estudos sôbre a alotropia do ferro. Já em 1600 Gilbert, (4) físico inglês, observou que o ferro perdia o seu ferro-magnetismo quando aquecido e admitiu que a causa residia em modificação de uma forma de ferro para outra. Barrett, em 1700, observou o fenômeno de recoalescência, aumento momentâneo na temperatura que o ferro apresenta em seu resfriamento, e associou-o à uma mudança de fase, isto é, à alotropia. Tschernoff, na Rússia estudando êstes fenômenos designou os pontos alotrópicos com a letra A, designação esta até hoje mantida para êsses pontos críticos, Osmond (25) ampliou os estudos das ligas ferro-carbono, os aços, e os seus dados foram representados por Sauveur (26) num diagrama temperatura-concentração, diagrama de fases para êste sistema. Osmond observou que os pontos críticos baixavam à medida que aumentava a velocidade de resfriamento e Howe estudou ulteriormente êste fenômeno em detalhe, (32) e essa observação teve posteriormente grandes consequências.

O começo dêste século foi fértil; surgiu a ciência metalúrgica moderna que viria depois a se transformar num imenso edifício de conhecimento científico, de teoria e de recursos de engenharia e de técnica.

Em 1919 Portevin, (35) na França, repetindo o trabalho de Osmond, observou de novo o efeito do aumento da velocidade de resfriamento sôbre o abaixamento dos pontos críticos; estendendo suas pesquisas a valores elevados da velocidade de resfriamento observou que êste abaixamento gradual é interrompido para uma certa velocidade crítica de resfriamento e que ocorria um novo ponto crítico para temperaturas mais baixas. Para certas velocidades de resfriamento cuidadosamente ajustadas, ambos os pontos críticos foram observados, o superior A' e o inferior A". Esta foi a descoberta da "transformação bipartida". Reconheceu Portevin que o ponto crítico inferior, A", é associado à formação do constituinte duro martensita e que o ponto superior, A', como se sabia, à da perlita. Notou também que A" não é afetado pela velocidade de resfriamento; e, o que é muito importante, relacionou êstes resultados às velocidades de resfriamento obtidas em diversas partes de grandes barras temperadas e, de uma forma precisa, apresentou a teoria simples da profundidade de endurecimento. Pouco depois, Chapin, (34) nos Estados Unidos, observou que o aço resfriado muito rapidamente até pouco acima de A" permanecia inalterado, isto é, que não se tornava magnético mesmo para um longo período de tempo. O trabalho de Osmond, de Howe, de Portevin e de Chapin foram então sintetizados em 1930 por Bain, (35) através da introdução de uma técnica nova, no conceito fundamental da "curva em S".

Bain notou que êstes pesquisadores haviam estudado a transformação da austenita em seus vários produtos *durante o resfriamento*. Sabia que se tratava de uma reação de solução sólida e acreditou que o problema se tornaria mais simples se a reação fôsse estudada isotermicamente, isto é, à temperatura constante, porque, se qualquer reação se desenvolvesse ao longo de uma faixa de temperaturas, apresentaria a complicação resultante de reações superpostas ocorrendo em diferentes temperaturas. Empregando amostras muito pequenas e resfriando-as muito rapidamente, em banhos de chumbo mantidos a temperaturas determinadas, êle pôde acompanhar as mudanças que ocorriam na austenita em função do tempo. Poude assim medir a *velocidade* da formação da perlita; observou mais que essa velocidade aumentava até uma temperatura para a qual desaparecia o ponto A' de Portevin; observou também que para temperaturas mais baixas diminuía a velocidade de decomposição da austenita e que, em lugar da perlita, aparecia um novo constituinte, conhecido agora como bainita. Notou que a velocidade de formação da bainita se tornava cada vez menor à medida que se aproximava das temperaturas estudadas por Chapin e que, para temperaturas ainda mais baixas, a martensita formava-se bruscamente, no ponto A". Representou essas diversas velocidades em função das tempera-

turas, resultando a “curva S”; estudos posteriores sobre aços-ligas complexos mostraram que a curva pode ter formas outras que a de um “S”, (36) e recentemente elas têm sido chamadas, mais adequadamente, “curvas T-T-T” — tempo, temperatura, transformação.

A “curva em S” é deslocada para tempos de reação decrescentes pela introdução de elementos de liga e pelo aumento do tamanho de grão da austenita; as curvas de resfriamento superpostas mostram que estes deslocamentos correspondem a um aumento de profundidade de endurecimento, os quais podem ser calculados atualmente a partir dos teores dos elementos de liga (37) e do tamanho de grão da austenita, fornecendo assim regras quantitativas que governam a profundidade de endurecimento. As pesquisas recentes têm sido dedicadas ao estudo da estrutura dos produtos de reação bem como às velocidades dos processos; sabe-se, com efeito, que perlita se forma da austenita por um processo de nucleação e crescimento dos nódulos de perlita e tem sido muito grande o trabalho de pesquisa dedicado à medida das velocidades de nucleação e de crescimento. (12) O desenvolvimento dos novos Aços de Emergência Nacional (National Emergency Steels), que contêm pequenos teores de elementos de liga para economizar metais de grande dificuldade de obtenção, foi possibilitado pelo perfeito conhecimento dos efeitos quantitativos de pequenas quantidades de elementos de liga sobre a profundidade de endurecimento; esses aços foram de um valor inestimável para o esforço de guerra e constituem um excelente exemplo da importância prática da teoria aplicada aos problemas de engenharia metalúrgica.

Estrutura Cristalina dos Metais: —

Desde o tempo de Dalton que os cientistas começaram a considerar seriamente a matéria em termos de átomos. Com o desenvolvimento da teoria cinética dos gases e com a sua aplicação ao campo das soluções diluídas, os problemas de físico-química estavam firmemente fundados sobre o princípio atômico. Entretanto os metais, que apresentam uma inércia de estado físico sem nenhuma estrutura aparente, permaneceram por longo tempo à margem da teoria. Na realidade, os mineralogistas conheciam já muito bem os cristais octaédricos de cobre, de prata e de ouro nativos e com os progressos da química descritiva do século XIX existiam fragmentos de evidência acumulada tendendo a mostrar a estrutura cristalina dos metais. Um dos fundamentos mais importantes residia na estrutura de Widmanstaetten dos meteoritos.

A cristalografia progrediu a largos passos neste século. As observações dos mineralogistas, petrógrafos e químicos sobre a forma exterior de minerais e compostos químicos resultaram no

desenvolvimento de uma linda ciência, muito embora complexa. Entretanto a cristalografia, expressa em termos das posições de átomos, foi de desenvolvimento bem mais lento. Fedorov, Schönlies e Barlow (38, 39, 40) independentemente chegaram à conclusão de que era de 230 o número de maneiras pelas quais os átomos podem se dispôr no espaço a três dimensões. A cristalografia teórica estava bem desenvolvida mas não havia nenhum processo pelo qual pudessem ser efetivamente determinadas as posições dos átomos no espaço.

Em 1912, o professor Max von Laue da Universidade de Munich frequentava uma série de reuniões durante as quais se discutia a natureza dos raios-X, descobertos em 1895 por Röntgen. (41) Neste tempo se pensava que os raios-X devessem ser ondas de comprimento de onda muito curto mas faltava ainda uma prova definitiva. Von Laue estava pensando sobre a luz de uma maneira geral; lembrou-se de que uma grade difrata a luz comum e que esta difração constituía a prova da natureza ondulatória da luz mas, pensou, a grade de difração não poderia difratar os raios-X possivelmente porque o seu comprimento de onda devia ser curto por demais. Se isto fôsse verdade, poder-se-ia resolver esta questão desde que se dispuzesse de uma outra grade de difração na qual as linhas fossem muito mais aproximadas. O problema residia em como encontrar tal grade. Lembrou-se então von Laue da teoria dos reticulados dos cristais com a esquematização de átomos dispostos em ordens nas três dimensões. Sendo o distanciamento entre as ordens somente de uma distância atômica, estaria aí a procurada grade de difração extremamente fina. Destacou dois de seus assistentes para a experiência, Friedrich e Knipping, e estes obtiveram a primeira fotografia de difração de raios-X. (42) Esta descoberta foi extremamente importante porque, simultaneamente, demonstrou a natureza ondulatória dos raios-X e, além disso, das posições das manchas de difração na fotografia resultou um processo pelo qual o arranjo dos átomos no espaço podia ser determinado experimentalmente.

Este método foi rapidamente aplicado em todos os laboratórios do mundo, por Bragg (43) na Inglaterra, Hull nos Estados Unidos, etc. Hull e Debye desenvolveram independentemente um método simples para a determinação dos tipos de estrutura cristalina, empregando raios-X monocromáticos sobre o pó da amostra. Este constitui um método simples de grande aplicação especialmente para metais e é o chamado "método do pó". Além deste, muitos outros métodos foram desenvolvidos e posteriormente utilizados. (14)

O emprego do método, para metais, propagou-se rapidamente entre muitos pesquisadores. Foram determinadas as estruturas de todos os metais puros e começaram a surgir imediatamente

princípios simples relativos ao comportamento dos metais, como por exemplo que os metais macios e dúcteis apresentam a estrutura cúbica. O interessante assunto da estrutura das ligas foi estudado principalmente por Westgren na Suécia. (14)

O estudo das ligas desenvolveu-se rapidamente. (14) Logo se descobriu que existem analogias, de grande importância, na estrutura dos sistemas de ligas, como por exemplo as ligas que os metais cobre, prata e ouro formam com os metais do sub-grupo B da lista periódica de elementos. Verificou-se que as fases intermediárias grupam-se em relativamente pequeno número de tipos de estrutura. Verificou-se que metais semelhantes sob o ponto de vista químico formam estruturas cristalinas semelhantes, e a lista periódica dos elementos de Mendeleff encontra uma aplicação fundamental nesta nova ciência. Existirá por acaso exemplo melhor em toda a história da ciência do que a grande importância do trabalho fundamental que é a lista periódica dos elementos de Mendeleff? Foram determinadas as estruturas da austenita, da cementita e da ferrita; ficou resolvida a velha discussão do ferro, ferro magnético alfa e do ferro paramagnético beta, visto que ambas as formas têm a mesma estrutura cristalina; reconheceu-se a temperatura Curie era uma mudança nas propriedades magnéticas e não uma mudança de fase ou mudança alotrópica.

O estudo das soluções sólidas revelou através de trabalho original de Bain (44) um novo tipo de transformação em ligas: o da formação de super-reticulados (superlattices). Este tipo de reação, a qual foi encontrada pela primeira vez nas soluções sólidas de cobre e ouro, ocorre, como se sabe hoje, em grande número de sistemas de soluções sólidas. (14) Possui muitas características diferentes das simples mudanças de fase; no exemplo mais simples, o tipo de estrutura cristalina permanece o mesmo; em temperaturas elevadas, como por exemplo no sistema cobre-ouro, os átomos de cobre e de ouro estão distribuídos ao acaso num reticulado comum; no resfriamento, a uma temperatura crítica, êsses átomos começam a ocupar posições ordenadas com relação aos outros. A intensidade com a qual a ocupação dêsses lugares ordenados tem lugar aumenta à medida que diminue a temperatura. A imagem da estrutura ordenada pode ser sugerida simplesmente considerando-se uma linha de átomos através do reticulado — na forma completamente ordenada a cada átomo de cobre segue um átomo de ouro e assim sucesivamente.

Êstes novos resultados das pesquisas sobre os super-reticulados, agora mais conhecidos pelo nome "reações de ordem e desordem", e os novos elementos sobre a constituição dos sistemas de ligas e sobre a plasticidade dos metais atraíram a atenção dos físicos para os diversos problemas de comportamento dos metais

sólidos. E' na realidade extremamente complexa a ciência dos metais; com as pesquisas nos últimos anos, pesquisas nas quais as energias eletrônicas e de posição começam a poder ser analisadas, a ciência dos metais vai se tornando cada vez mais uma ciência quantitativa. (45, 46) O metalurgista de pesquisas necessita hoje em dia conhecer êste trabalho para se rejuvenecer, como deve todo o cientista de tempo em tempo. A ciência é sempre nova e os cientistas precisam acompanhar de perto seus progressos.

Plasticidade dos Metais: —

Além do brilho metálico, nenhuma outra propriedade é tão característica dos metais como a sua plasticidade, descrita em termos de maleabilidade, ductilidade, etc. Foi reconhecida e utilizada pelos antigos e desde então tem sido utilizada com crescente conhecimento mas a compreensão científica da plasticidade ficou para o fim do século passado.

Muito embóra só em 1914 houvessem sido descobertos os métodos para o conhecimento da estrutura cristalina dos metais, desde o século passado que se sabe que os metais são cristalinos e que cada grão que constitue o agregado metálico dos metais comuns e de suas ligas é na realidade um pequeno cristal. Cada um desses cristais se deforma quando o metal é deformado. Os problemas são: qual o mecanismo da formação e porque os metais se deformam tão facilmente?

Em 1896, Ewing e Rosenhain (47) na Inglaterra observaram que as deformações dos cristais de chumbo eram acompanhadas da formação de linhas ao longo do cristal e puderam mostrar que esas linhas na superfície do metal representam as intersecções com os planos do cristal, planos sôbre os quais uma parte do cristal foi deslocada em relação à outra, isto é, escorregada sôbre a outra, e por essa razão êsses planos foram designados planos de escorregamento (slip planes); concluíram corretamente que êsses planos seguem orientações determinadas do reticulado dentro do cristal. Prossegue a deformação pela formação de número cada vez maior destes planos de escorregamento e de rotação do cristal, sem perda de coesão e de resistência através dos planos; na realidade aumenta a resistência. O estudo deste processo foi grandemente auxiliado pela descoberta posterior de métodos pelos quais se pôde obter cristais isolados de metais poli-cristalinos. Dentre diversos métodos, o mais simples é o de solidificação extremamente lenta e quando se consegue tal solidificação, propagando-se lentamente dentro de um tubo a partir da extremidade inferior à superior, podem-se obter cristais isolados muito grandes. Êsses cristais isolados oferecem muitas vantagens no estudo da plasticidade, visto que deixam de existir os contornos dos grãos e o

escoamento no cristal não é impedido pela interferência do escoamento de um cristal vizinho.

Esta pesquisa foi continuada em muitos centros científicos do mundo, na Alemanha, na Inglaterra e nos Estados Unidos. Verificou-se de início que princípios simples de cristalografia e de mecânica governam o processo. O escorregamento tem lugar em determinado plano cristalográfico e na direção das fiadas de átomos nesse plano. A deformação necessária para iniciar o escorregamento num cristal é a correspondente à tensão de tração (ou de compressão ou de torsão) aplicada ao cristal, resolvida na componente de cisalhamento nesse plano e nessa direção. Verificou-se que essa tensão de cisalhamento resultante é constante para um dado metal; é conhecida agora pela designação "tensão crítica de cisalhamento". (48)

Os metais se deformam também pela formação de maclas e mostrou-se que existe também para isso uma tensão crítica de cisalhamento. Entretanto a fratura geralmente tem lugar por um afastamento perpendicular dos planos do reticulado e neste caso verificou-se que existe uma tensão crítica normal. Estes princípios generalizados para incluir o efeito das deformações progressivas, com geração de orientação preferenciais e das propriedades direcionais decorrentes, colocaram na realidade o estudo da plasticidade dos metais em base científica e quantitativa. (14, 45, 48)

O problema da ruptura dos metais continua a ser difícil apesar de ser um problema metalúrgico dos mais importantes. Na prática a ruptura pode ocorrer por deformação excessiva no estado de tração, isto é, simplesmente pela carga estática excessiva, como um ensaio de tração, ou como mais frequentemente por se se exceder de fadiga por tensões alternadas. Muito embora sejam bem conhecidos os característicos da fadiga, pouco se sabe acerca das condições que tendem a determinar a ruptura por fadiga. As brilhantes pesquisas de Taylor (49) sobre o mecanismo atômico do escorregamento, a chamada "teoria dos deslocamentos", ainda não esclareceram este difícil ponto. Na realidade, mesmo a ruptura por carga estática simples não está ainda perfeitamente explicada. Os cálculos da resistência teórica dos metais mostram valores até dez vezes maiores que os observados na prática. Estes cálculos feitos na base de solicitações sobre pressões negativas em três dimensões, (50) muito embora falseados parcialmente pelos escorregamentos que precedem à fratura, fornecem valores muitíssimo elevados. Para contornar esta dificuldade, admitiu-se que os metais são imperfeitos sob o ponto de vista cristalográfico, isto é, que o grão do metal não é constituído por uma série de átomos arranjados em um único reticulado geometricamente perfeito, mas que existem imperfeições nessa disposição. Tais imperfeições determinam concentrações de tensões e consequente-

mente a ruptura sob esforços menores; os estudos sôbre as fibras de vidros (51) e em materiais não-metálicos nos quais se pode conseguir reduzir ao mínimo essas imperfeições, oferecem a prova indireta dêste ponto de vista.

O estudo da metalurgia passa por períodos de moda, tal como outras formas de atividade humana. Em certas ocasiões, um ou outro ramo da metalurgia recebe a atenção concentrada e do entusiasmo por novas pesquisas, resulta a importância de outros ramos momentaneamente esquecidos e ignorados. Conseqüentemente, produz-se certo desequilíbrio no adiantamento da fronteira do conhecimento científico, desequilíbrio êste corrigido com o tempo, porque se conquistam novos setores que se propagam, surpreendentemente, a outros setores do conhecimento. Convém que o metalurgista se lembre sempre de que o assunto em que está interessado envolve muitos outros setores e que sua especialização implica a responsabilidade de compreender as relações de seu trabalho com todo o campo científico. O grande campo da metalurgia encerra muitos assuntos fascinantes, de grande interesse para o pesquisador, e ao mesmo tempo exige sua competência em muitos campos — a vida de um metalurgista é muito interessante mas certamente não é fácil!

*

* *

Todos êstes foram relatos, muito breves, dos desenvolvimentos de uns poucos setores importantes da metalurgia. Nós herdamos do passado tôdas as realizações da ciência e da metalurgia. Como diz Berthollet, “se cada um de nós traz alguma coisa de novo ao domínio comum no campo da ciência, da arte e da moral, é porque muitas gerações viveram, trabalharam, pensaram e sofreram antes de nós”. As histórias que lhes contei são histórias do insaciável desejo humano de melhoria, de curiosidade e de ambição para criar alguma coisa de permanente.

Num mundo prático como o nosso é estranho que a ciência seja fortemente idealista. Ela se desenvolve baseada em experiências e não respeita pessoas ou autoridades; se um neófito qualquer puder provar que Einstein está errado, ninguém poderá contradizê-lo. Os laboratórios, disse Pasteur, são templos. Pensar, experimentar e formar uma teoria; experimentar a teoria e observar os fatos que a contradizem; experimentar de novo e melhorar sempre, eis o método para a pesquisa da verdade na ciência. E cada geração, uma em seguida à outra, defrontando-se com as mesmas dificuldades e encontrando dificuldades novas, experimenta a compreensão da verdade na natureza. Todos êsses homens do passado muito contribuíram para o mundo em que vi-

vemos. Em todos êles se pode encontrar os defeitos humanos comuns: ambição, preguiça, fraqueza em tôdas as suas formas e apesar disso eu penso que êles representam os homens mais extraordinários que o mundo já conheceu.

Não se deve pensar que êstes trabalhos não tiveram uma relação com o bem estar do povo: é sôbre o trabalho de homens como êstes, e de muitos outros, em outros campos de ciência e da engenharia, que repousa o nosso mundo material de hoje e é dô exemplo deles que nós nos servimos com crescente capacidade e honestidade no pensamento. Nem se deve também supor que a pesquisa pura seja exclusivamente de interêsse científico. O trabalho de Faraday sôbre a indução nos deu a eletrotécnica, e de Hertz sôbre as ondas elétricas, o rádio; porque, se se deseja o progresso em ciência aplicada, deve-se ter antes a ciência pura. Devemos nos lembrar êste conceito frequentemente, porque é muitas vezes esquecido num mundo prático como o nosso. Lembre-se de que o estadista Gladstone observou a Faraday ao acompanhar um de seus ensaios em seu laboratório: "Mas, Sr. Faraday, afinal das contas para que vai servir isto?" E respondeu Faraday: "Ora, há tôda a probabilidade do senhor fazer incidir sôbre isso algum imposto". Faraday foi de imenso valor para a Inglaterra e Huxley disse "se uma nação pudesse adquirir um potencial Watt ou Davy ou Faraday pelo preço de alguns milhões de libras faria excelente negócio. E' sabido e corriqueiro que do trabalho dêsses homens resultaram riquezas extraordinárias no mais restrito sentido econômico". E se isto fôr exato, devemos todos cultivar nossa ciência e nossos cientistas, nossa engenharia e nossos engenheiros, para o bem geral dos nossos países e do mundo.

Eu estive lhes falando sôbre os ideais da ciência e da engenharia e sôbre o espírito da pesquisa pela verdade e das realizações. Êstes são os ideais e o espírito que vão incentivar a nova Associação Brasileira de Metais. Pasteur disse: "Abençoados aqueles que conduzem consigo um ideal e o seguem, ideal de arte, de ciência ou de virtude; neles estão as fontes que inspiram os grandes pensamentos e as grandes realizações".

REFERÊNCIAS

1. **Man and Metals**, T. A. Rickard, McGraw-Hill Book Company, New York (1932)
2. **Iron in Antiquity**, J. N. Friend, Griffin and Company, London, (1926)
3. **Ancient Egyptian Metallurgy**, H. Garland, Griffin and Company, London, (1927)
4. **Roberts-Austen, a Record of His Work**, S. W. Smith, Griffin and Company Limited, London (1914).

5. **The Works of Francis Bacon**, Parry and McMillan, London (1854) Volume II, "miscellaneous physiological remains, origins of questions touching minerals", pag. 458.
6. N. T. Belaiew, *Mineral Magazine*, **20** (1923-25), 173, n.º 8
7. Robert F. Mehl, *Carnegie Magazine*, **XI**, (1938)
8. **Meteoritenkunde**, E. Cohen, Stuttgart, (1894 and 1905)
9. Robert F. Mehl and C. S. Barrett, *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, **93**, (1931), 78.
10. C. Sorby, *Journal of Iron and Steel Institute*, **1** (1896), 140.
11. V. K. Zworykin, *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, **152**, (1934), 13.
12. Robert F. Mehl, *Transactions of the American Society for Metals*, **29** (1941) 313.
13. F. Osmond and G. Cartaud, *Revue de Metallurgie*, **69** (1904), 78.
14. **Structure of Metals**, C. S. Barrett, McGraw-Hill Book Company, New York, (1943).
15. G. Derge and A. R. Kommell, *American Journal of Science*, September (1937).
16. J. Young, *Proceedings of the Royal Society*, **112** (1926) 630.
17. Robert F. Mehl and L. Jetter. Symposium on Age Hardening of Metals, *Transactions American Society for Metals*, (1939), 342.
18. A. Wilm, *Metallurgie*, **8** (1911) 225.
19. P. D. Merica, R. G. Waltenberg and H. Scott, *Bulletin American Institute of Mining and Metallurgical Engineers* (June 1919), 913.
20. **Symposium on Age-Hardening of Metals**, American Society for Metals, (October, 1939).
21. **Science of Metals**, Z. Jeffries and R. S. Archer, McGraw-Hill Book Company, New York (1924).
22. W. L. Fink and D. W. Smith, *Transactions of American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, **124** (1937) 162; **128** (1938) **223** **122** (1936) 12 4.
23. C. S. Barrett, A. H. Geisler and Robert F. Mehl, *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, 143 (1941) 134; (ver tambem outros artigos dos mesmos autores na mesma revista).
24. C. T. Heycock and F. H. Neville, *Philosophical Transactions* **202** (1903) 1.
25. **On the Critical Points of Iron and Steel**, F. Osmond, *Journal of Iron and Steel Institute*, **36** (1890) 38.
26. **Metallography and Heat-Treatment of Iron Steel**, A. Sauveur, Sauveur and Boylston, Cambridge, Massachusetts (1920).
27. **The Collected Works of J. Gibbs**, Longmans, Green and Co., New York (1929).
28. **Die Heterogenen Gleichgewichte von Standpunkte der Phasenlehre**, H. W. B. Roozeboom, Friedrich Viewig, Braunschweig, (1901-1918).
29. **Lehrbuch der Metallkunde**, G. Tammann, Voss, Leipzig, (1932).

30. **The Structure of Metals and Alloys**, W. Hume-Rothery, Institute of Metals, London, (1936).
 31. **L'art de Convertir le Fer in Acier e L'Art d'Adoucir le Fer Fondu**, Paris, Brunet, (1722).
 32. H. M. Howe and A. G. Levy, *Journal of the Iron and Steel Institute*, **94** (1916) n. 1,210.
 33. A. M. Portevin and M. Garvin, *Journal of the Iron and Steel Institute* **99** (1919) 469.
 34. W. R. Chapin, *Transactions of the American Society for Steel Treating*, **2** (1922) 507.
 35. E. C. Bain, *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, (1930) 117. (ver tambem outros trabalhos deste autor na mesma revista).
 36. E. S. Davenport, *Transactions of the American Society for Metals*, **27** (1939) 837.
 37. M. A. Grossmann, *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, **150** (1942) 227.
 38. E. Fedorov, *Zeitschrift für Kristallographie*, **24** (1895) 209.
 38. **Kristallsysteme und Kristallstruktur**, A. Schonflies, Leipzig, (1891).
 40. **W. Barlow**, *Zeitschrift Kristallographie*, **23** (1894) 1.
 41. W. K. Rontgen, *Annalen der Physik*, **64** (1898) 1.
 42. M. von Laue, *Stizungberichte mathematics - physics*, Klasse Bayer Akad. Wiss. München (1912) 363.
 43. **The Crystalline State**, W. L. Bragg, MacMillan Book Company, New York, (1934).
 44. E. C. Bain, *Chemical Metallurgical Engineering*, **28** (1923), 21, 65; *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers* **68** (1923) 625.
 45. **Physics of Metals**, Frederick Seitz, McGraw-Hill Book Company, New York (1943).
 46. **Theory of Metals and Alloys**, A. F. Mott and H. Jones, Oxford University Press, New York, (1936).
 47. A. Ewing and W. Rosenhain, *Philosophical Transactions, Royal Society*, **193A** (1900) 353.
 48. **Kristallplastizität**, E. Schmid and W. Boas, Springer, Berlin (1935).
 49. G. I. Taylor, *Proceedings Royal Society*, **A145** (1934) 362.
 50. Robert F. Mehl, *Journal American Chemical Society* **52** (1930) 534.
 51. A. A. Griffith, *Transactions Royal Society* **A221** (1920) 163, *Proceedings International Congress of Applied Mechanics* (1924) 55.
-